



## ПРОГНОЗНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ: СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

П.Г. Сорокина<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

### Информация о статье

Дата поступления  
16 мая 2022 г.

Дата принятия к печати  
3 октября 2022 г.

Дата онлайн-размещения  
8 ноября 2022 г.

### Ключевые слова

Байкал; уровень воды;  
эконометрическая модель;  
прогнозирование; социально-  
экономические и экологические  
последствия

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке  
Министерства науки и высшего  
образования РФ, проект  
«Эколого-экономическая  
оценка функционирования  
пресноводных биогеоценозов,  
фундаментальный и прикладные  
аспекты», номер госрегистрации  
AAAA-A19-119070190033-0,  
№ МИНОБРНАУКИ 0279-2019-  
0003

Original article

## PREDICTIVE ANALYSIS OF WATER-LEVEL CHANGES IN LAKE BAIKAL: SOCIAL, ECONOMIC, AND ENVIRONMENTAL IMPACTS

Polina G. Sorokina<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation

### Article info

Received  
May 16, 2022

Accepted  
October 3, 2022

### Аннотация

На протяжении многих лет ученых, общественность, а также население прибрежных населенных пунктов волнует вопрос уровня воды в Байкале, так как его колебания приводят к тем или иным социально-экономическим и экологическим проблемам. В связи с этим для прогнозирования уровня воды в Байкале весьма актуально решение задачи построения математических моделей зависимости уровня от факторов, влияющих на его значение. Цель данной работы состоит в построении такой математической модели с использованием эконометрических методов исследования. В процессе анализа построено шесть эконометрических моделей. После проверки их на адекватность отдано предпочтение полиномиальной модели, на основании которой были построены точечный и интервальный прогнозы. Средняя ошибка полученной аппроксимации (среднее отклонение прогнозных значений уровня воды от фактических) составляет 0,03 %, что свидетельствует о высокой точности выбранной модели. Также в работе обсуждаются возможные (отчасти уже имеющие место) социально-экономические и экологические проблемы двух промысловых районов — Баргузинского залива и залива Провал. Данное исследование носит прикладной характер и является промежуточным. В дальнейшем автор планирует улучшить качество модели за счет увеличения числа возможных факторов, влияющих на изменение уровня оз. Байкал.

### Abstract

For many years, scientists, the public, as well as the population of coastal settlements have been concerned about the water level in Baikal, as its fluctuations lead to various socio-economic and environmental problems. In this regard, to predict the water level in Baikal, the task of building mathematical models of the dependence of the level

Available online  
November 8, 2022

### Keywords

Baikal; water level; econometric model; forecasting; socio-economic and environmental impacts

### Acknowledgements

This work was financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project «Ecological and economic assessment of the functioning of freshwater biogeocinosis, fundamental and practical aspects», no. registration AAAA-A19-119070190033-0, number MINOBRNAUKI 0279-2019-0003

### Введение

Данное исследование лежит в русле работ [1–4], посвященных изучению уровня оз. Байкал, колебания которого могут приводить к социально-экономическим и экологическим последствиям.

Согласно постановлению Правительства РФ «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2022–2023 годах» от 16 марта 2022 г. № 379, максимальное и минимальное значения уровня воды в Байкале в период средней водности находятся на отметках соответственно 457 и 456 м; минимальное значение уровня воды в маловодный период составляет 455,54 м; максимальное значение уровня воды в многоводный период — 457,85 м<sup>1</sup>. Экстремально высокая или низкая водность Байкала может привести к ряду негативных экологических и социально-экономических последствий [5–7].

Описание, моделирование, а также прогнозирование уровня режима озер являются сложнейшей задачей современной науки. Данный показатель зависит от влияния многочисленных природных и антропогенных факторов, не все из которых можно подходящим образом измерить и учесть при моделировании. Статья состоит из двух частей. В первой части обсуждаются социально-экономические и экологические проблемы, связанные с изменением уровня воды в двух промысловых районах оз. Байкал. Во второй части строится эконометрическая модель, по

которой делается точечный и интервальный прогнозы. на факторы, которые влияют на ее важность, очень актуально. Целью данной работы является построение такой математической модели с использованием эконометрических методов исследования. Были построены шесть эконометрических моделей. После проверки их адекватности, автор выбрал полиномиальную модель, на основе которой были построены точечные и интервальные прогнозы. Средняя ошибка аппроксимации (среднее отклонение от фактического уровня воды) составляет 0,03 %, что свидетельствует о высокой точности выбранной модели. В работе также рассматриваются возможные (некоторые из уже существующих) социально-экономические и экологические проблемы в двух промысловых районах — в Баргузинском заливе и в заливе Дебале. Данное исследование является разведочным и имеет практическую ценность. В будущем автор планирует улучшить качество модели, увеличив количество факторов, влияющих на изменения уровня озера Байкал.

которой делаются точечный и интервальный прогнозы.

### Социально-экономические последствия при изменении уровня воды

По официальным данным сайта Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор)<sup>2</sup>, длина береговой линии оз. Байкал составляет 2 100 км, при этом западное побережье — скалистое и обрывистое, а восточное — более пологое. Учитывая рельеф береговой линии, рассмотрим, как влияет увеличение и уменьшение уровня воды на прибрежную зону восточного побережья, так как основные последствия прибывающей воды испытывает на себе именно этот берег. В качестве изучаемых участков выделим два промысловых района — Баргузинский залив и залив Провал.

*Баргузинский залив* — самый крупный и глубокий залив Байкала, площадь которого составляет 725 км<sup>2</sup>, протяженность береговой линии — 90 км. Южные и северные берега залива гористые. На его побережье расположены поселок городского типа Усть-Баргузин и село Максимиха. Здесь находится множество туристических баз и пансионатов, принимающих большой поток туристов. Также эта местность входит в Забайкальский национальный парк, здесь расположен знаменитый эколого-этнографический парк-музей «Светлая Поляна». По

<sup>1</sup> Здесь и далее используется Тихоокеанская система высот.

<sup>2</sup> URL: [https://rpn.gov.ru/activity/baikal/?PARENT\\_CODE\\_PARAM=activity&baikal%2F%3FREGION\\_CODE=12](https://rpn.gov.ru/activity/baikal/?PARENT_CODE_PARAM=activity&baikal%2F%3FREGION_CODE=12).

данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Республике Бурятия<sup>3</sup>, численность постоянного населения на 1 января 2021 г. в поселке городского типа Усть-Баргузин составляла 6 894 чел., в селе Максимиха, по данным переписи населения, — 297 чел.

Залив Провал является третьим по величине заливом, протяженность береговой линии которого — 45 км. На побережье залива расположены населенные пункты, такие как село Дубинино, село Оймур и улус Дулан, а также объект регионального значения Энхалукский государственный природный биологический заказник, в котором можно встретить редкие виды животных и птиц. На 1 мая 2022 г., по оценке службы государственной статистики, численность населения села Дубинино составляла 253 чел., села Оймур — 1 457 чел., улуса Дулан — 117 чел.

Рассмотрим, к каким социально-экономическим последствиям для этих прибрежных населенных пунктов может привести уменьшение или увеличение уровня воды в оз. Байкал.

Для определения расстояния ( $\Delta l$ , м), на которое вода в результате увеличения уровня ( $\Delta h$ , м) уйдет вглубь материка, будем использовать карту уклонов оз. Байкал<sup>4</sup>.

Угол наклона береговой линии Баргузинского залива протяженностью около 70 км составляет 1 %. Оставшийся участок (около 20 км) учитывать в исследовании не будем, так как он приходится на крутую скалистую местность. В то же время угол наклона бе-

реговой линии залива Провал также составляет 1 %.

Произведем оценку расстояния  $\Delta l$  в случае, когда уровень воды  $\Delta h$  поднимется с 0,1 до 1,2 м с шагом 0,1 м (рис.).

Расстояние, на которое вода в результате подтопления может уйти вглубь материка, можно оценить по формуле  $\Delta l = \Delta h / \text{tg}1^\circ$  и при заявленном увеличении уровня воды  $\Delta h$  и уровне наклона 1 % принимает соответствующее значение  $\Delta l$  (табл. 1).

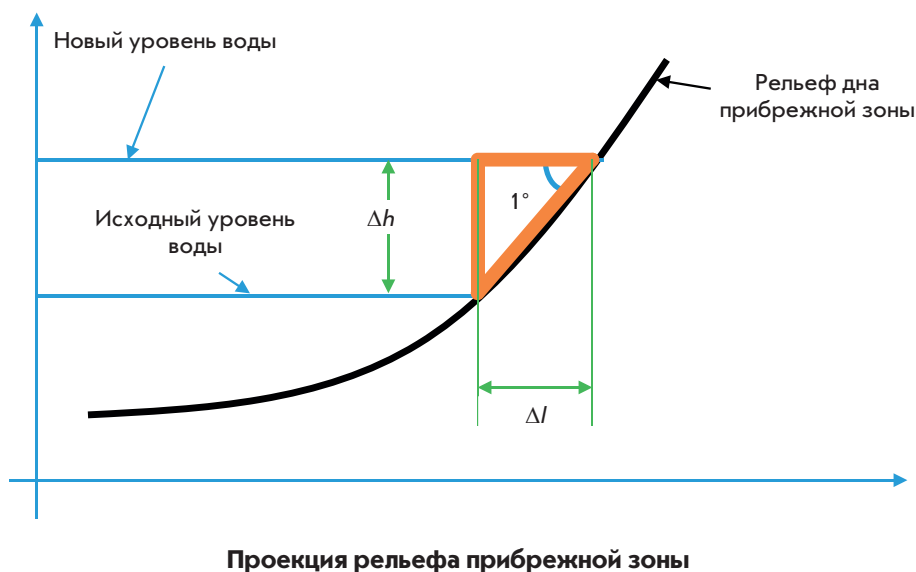
Таблица 1  
Значения изменения уровня воды  $\Delta h$  и расстояния подтопления  $\Delta l$ , м

$\Delta l$	$\Delta h$
0,1	5,7
0,2	11,5
0,3	17,2
0,4	22,9
0,5	28,6
0,6	34,4
0,7	40,1
0,8	45,8
0,9	51,6
1,0	57,3
1,1	62,9
1,2	68,6

Как видно из данных табл. 1, при повышении уровня воды на 1 м береговая линия на этом участке смещается вглубь материка примерно на 57,3 м, что приводит уже к увеличению уровня грунтовых вод и подтоплению жилых построек и объектов инфраструктуры, находящихся на первой береговой линии прибрежных населенных пунктов. Данная ситуация может влиять на

<sup>3</sup> URL: <https://burstat.gks.ru/demo>.

<sup>4</sup> URL: <http://www.lin.irk.ru/intas/slope.pdf>.



инфраструктуру Чивыркуйского перешейка, соединяющего полуостров Святой Нос с материком, как следствие, возможен переброс воды из Баргузинского залива в Чивыркуйский, что приведет к нарушению сообщения с населенными пунктами на территории национального парка. Размытие автодорог отрезает половину населенных пунктов от районного центра.

Дальнейший рост воды в озере ставит под угрозу затопления не только населенные пункты, но и природные объекты и приведет к экологическим последствиям. Так, размывание береговой полосы в озере негативно влияет на экосистему Забайкальского национального парка, где обитают многие виды животных и птиц, занесенных в Красную книгу, растут разные виды эндемичных растений. Повышение уровня воды значительно сокращает площадь прибрежной зоны оз. Байкал, нарушая естественные процессы.

Как было отмечено выше, данные заливы имеют важное промысловое значение. Одними из определяющих факторов, влияющих на популяцию байкальского омуля, воспроизводимого как естественным, так и искусственным способом, являются водность нерестовых рек и уровень вод озера. Затопление или обмеление существенно меняют условия воспроизводства не только рыб, но и водоплавающих птиц на мелководьях. Установлено, что процесс адаптации рыб к изменению кормовых баз и смещению мест нерестилищ идет более 60 лет [8–10].

В [11] с использованием геоинформационных систем QGIS и SAGA [12] проведена оценка объема воды для залива Провал ( $V$ ), по результатам которой он составляет  $0,515 \text{ км}^3$ . При падении уровня воды на  $0,6 \text{ м}$  объем воды залива уменьшится на  $2,136 \%$ , а при падении уровня воды на  $1,2 \text{ м}$  объем воды уменьшится на  $5,049 \%$  и составит  $0,489 \text{ км}^3$ . Данный показатель важен для расчета приемной емкости водоема, от которой зависит уровень кормовых запасов, численность молоди байкальского омуля в данном заливе.

В связи с этим возникает необходимость построения математической модели зависимости уровня Байкала, которую в дальнейшем можно использовать для построения прогнозного анализа.

### Ретроспективный и прогнозный анализ изменения уровня воды

**Математическая постановка.** Для прогнозирования уровня воды в Байкале необходимо построить математическую модель зависимости уровня от факторов, влияющих

на его значение. На первом этапе исследования отбираются независимые факторы, которые могут влиять на динамику уровня. Далее следует собрать статистические данные, провести их предварительный анализ. В качестве эмпирической базы применяются данные, предоставленные Лимнологическим институтом СО РАН с 1960 по 2018 г. На следующем шаге с помощью анализа парных коэффициентов корреляции производится отбор значимых факторов. С использованием методов регрессионного анализа строятся эконометрические модели зависимости уровня воды от факторов, влияющих на его изменение. По итогам анализа необходимо отобрать наилучшую модель и построить по ней точечный и интервальный прогнозы.

Изменение уровня воды является результатом воздействия на него целого ряда взаимосвязанных и взаимозависимых антропогенных и природных факторов.

Обозначим через  $Y$  зависимую (результатирующую) переменную — среднегодовое значение уровня воды в Байкале ( $\text{м}$ ). В качестве независимых факторов (объясняющих переменных), от которых предположительно зависит результирующий показатель, выберем  $x_1$  — среднегодовой расход Иркутской ГЭС ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $x_2$  — среднегодовой суммарный приток в озеро Байкала ( $\text{м}^3$ ).

Используя данные прил. 1, приступим к построению модели регрессии. В результате предварительного анализа фактор  $x_2$  исключаем из рассмотрения ввиду его высокой интеркорреляции и незначимого влияния на результирующий показатель [13]. Таким образом, в дальнейшем исследовании участвует только фактор  $x_1$ .

Построим следующие шесть моделей регрессии, отражающих связь между результирующей переменной  $Y$  и независимой переменной  $x_1$ :

- линейная:  $y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \varepsilon$ ;
- полиномиальная второй степени:  $y = \alpha + \alpha_{11} x_1 + \alpha_{12} x_1^2 + \varepsilon$ ;
- полулогарифмическая:  $y = \alpha_0 + \alpha_1 \ln x_1 + \varepsilon$ ;
- обратная:

$$y = \frac{1}{\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \varepsilon};$$

– степенная:  $y = \alpha_0 \cdot x_1^{\alpha_1} \cdot \varepsilon$ ;

– показательная:  $y = \alpha_0 \cdot \alpha_1^{x_1} \cdot \varepsilon$ .

Здесь  $\varepsilon$  — случайная ошибка наблюдения.

Поскольку автор не имеет теоретических обоснований предпочесть ту или иную функцию, то выберем наилучшую из них опытным

путем. Предварительно произведя линеаризацию нелинейных функций, применим ко всем линеаризованным моделям методы регрессионного анализа. Результаты расчетов параметров, оценка значимости, величина коэффициента детерминации  $R^2$  приведены в табл. 2.

Для того чтобы определить незначимые параметры, необходимо  $t$ -статистики параметров, записанные в скобках, сравнить с критической точкой — квантилем распределения Стьюдента, число степеней свободы которого составляет  $n - p$ , где  $n$  — число наблюдений,  $p$  — число параметров модели [13]. Поскольку  $t_{кр} = 2,002$ , то у всех построенных моделей при независимых переменных статистически значимые параметры, так как  $|t\text{-статистики}| > t_{кр}$ . В целом все модели являются значимыми, так как  $F$ -статистики моделей (см. табл. 2) больше, чем критическое значение  $F_{кр} = 4,01$ .

Учитывая, что у полиномиальной модели коэффициент детерминации  $R^2$  больше, отдадим предпочтение ей:

$$y = 453,5833 + 0,003x_1 + 0,000001x_1^2.$$

Коэффициент  $R^2 = 0,545$  показывает, что вариация уровня воды в Байкале на 54,5 % объясняется расходом Иркутской ГЭС, при этом оставшиеся 46 % приходятся на неучтенные в модели факторы. Например, такими значимыми факторами могут

быть температурный режим, количество осадков, испарение и т.д. Коэффициент эластичности  $\varepsilon$ , равный  $-0,003$ , приближенно показывает, что уровень воды в среднем уменьшится на 0,003 %, если сток через Иркутскую ГЭС в среднем за год увеличится на 1 %.

Средняя ошибка аппроксимации — среднее отклонение прогнозных значений уровня воды  $y_{расч}$  от фактических  $y_{факт}$  (прил. 2) — составляет  $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{59} \left| \frac{y_{факт} - y_{расч}}{y_{факт}} \right| \cdot 100 = 0,03 \% < 10 \%$ , что свидетельствует о

хорошо подобранной модели в виде полинома второй степени.

Предположим, что прогнозное значение независимой переменной  $\pm p\%$  изменится на  $x_1$  от среднего значения стока воды через ГЭС:  $\bar{x}_1 = 1820,0424 \text{ м}^3/\text{с}$ . Найдем верхнюю и нижнюю границы этой переменной.

Верхняя граница:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1^B &= \bar{x}_1 \cdot \left(1 + \frac{P \%}{100 \%}\right) = \\ &= 1820,0424 \cdot (1 + 0,01P), \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Нижняя граница:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1^H &= \bar{x}_1 \cdot \left(1 - \frac{P \%}{100 \%}\right) = \\ &= 1820,0424 \cdot (1 - 0,01P), \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Таблица 2

**Результаты оценки параметров линейной и нелинейных функций, представленных в линеаризованном виде**

Модели регрессии и $t$ -статистики параметров	Коэффициент детерминации $R^2$	Общий $F$ -критерий
Линейная регрессия $y = 455,32 + 0,001x_1 + \varepsilon$ (3126,18) (7,5)	$R^2 = 0,497$	$F = 56,303$
Полином второй степени $y = 453,5833 + 0,003x_1 + 0,000001x_1^2 + \varepsilon$ (623,37) (3,16) (-2,43)	$R^2 = 0,545$	$F = 33,533$
Обратная $\frac{1}{y} = 0,0022 - 2,8 \cdot 10^{-9}x_1 + \varepsilon$ (3138,65) (-7,5)	$R^2 = 0,497$	$F = 56,261$
Степенная $\ln y = 6,106 + 0,0024 \ln x_1 + \ln \varepsilon$ (2686,07) (7,88)	$R^2 = 0,522$	$F = 62,1597$
Показательная $\ln y = 6,121 + 1,3 \cdot 10^{-6}x_1 + \ln \varepsilon$ (19 173,55) (7,5)	$R^2 = 0,497$	$F = 56,282$
Полулогарифмическая $y = 448,224 + 1,091 \cdot \ln x_1 + \varepsilon$ (432,2259) (7,8855)	$R^2 = 0,522$	$F = 62,181$

При этом уровень воды при  $\bar{x}_1^p$  в верхней границе составит  $y^p = 453,5833 + 0,003\bar{x}_1^p - 0,000001 \cdot \bar{x}_1^{p2}$ , в нижней границе  $\bar{x}_1^n$  составит  $y^n = 453,5833 + 0,003\bar{x}_1^n - 0,000001 \cdot \bar{x}_1^{n2}$ . Например, пусть величина  $p = 8\%$ . Тогда при стоке воды  $\bar{x}_1^n = 1674,44 \text{ м}^3/\text{с}$  прогнозируемый по построенной модели уровень воды принимает значение  $y^n = 455,803 \text{ м}$ . При  $\bar{x}_1^p = 1965,65 \text{ м}^3/\text{с}$  прогнозируемый уровень воды составит  $y^p = 455,62 \text{ м}$  (чем больше сток, тем меньше уровень).

Точечный прогноз не всегда удобен для последующего анализа колебания уровня воды, поэтому найдем промежутки изменения зависимой переменной  $y$ , т.е. построим интервальный прогноз:

$$y_0 - t_v \cdot \Delta < y_0 < y_0 + t_v \cdot \Delta,$$

где значение квантиля Стьюдента  $t_v = 2,003$ , а стандартная ошибка предсказываемого среднего значения  $y$  находится по формуле

$$\Delta = \sigma \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x} - x_0)^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}},$$

где  $\sigma$  — стандартная ошибка регрессии,  $n$  — объем выборки,  $\bar{x}$  — среднее значение.

В целях построения доверительного интервала прогноза для значений  $x_0 = \bar{x}_1^n = 1674,44$  и  $y_0 = y^n = 455,803$  вычислим стандартную ошибку прогноза  $\Delta = 0,16635$ . Доверительный интервал прогноза уровня воды имеет вид  $(455,4698; 456,1362)$ . Таким образом уровень воды при показателе стока через ГЭС  $x_0 = \bar{x}_1^n = 1674,44 \text{ м}^3/\text{с}$  с вероятностью  $0,95$  находится в пределах от  $455,4698$  до  $456,1362 \text{ м}$ .

### Выводы

Конечно, уровень воды является результатом воздействия на него целого ряда взаимосвязанных и взаимозависимых антропогенных и природных факторов. Для улучшения качества модели, прогнозных оценок автор ставит перед собой задачу дальнейшего отбора факторов за рассматриваемый период наблюдения с 1960 по 2018 г. Поскольку фактор среднегодового расхода Иркутской ГЭС можно рассматривать как управляемую переменную, то автор также ставит перед собой задачу построения модели эффективного влияния на уровень Байкала с учетом некоторых критериев качества.

Приложение 1

Показатели данных за 1960–2018 гг.

Год	Уровень Байкала (среднее значение за год), м	Показатели расходов Иркутской ГЭС, т.е. сток через ГЭС (среднее значение за год), $\text{м}^3/\text{с}$	Приток в Байкал, $\text{м}^3$
	$y$	$x_1$	$x_2$
1960	456,2117	1797,833	5,359167
1961	456,3992	1976,583	5,425833
1962	456,6342	1875,667	6,1675
1963	456,7267	1851,333	5,198333
1964	456,8283	1987,417	5,361667
1965	456,5575	2035,25	4,87
1966	456,5033	2083,583	5,695
1967	456,5258	1999,083	5,5975
1968	456,5433	2048,083	5,49
1969	456,3192	1863,583	4,63
1970	456,355	1729	5,48
1971	456,5079	2295,25	6,001667
1972	456,2482	1694,083	3,891667
1973	456,4352	2166,583	7,686667
1974	456,4695	2358,083	4,931667
1975	456,219	1950,833	5,82
1976	456,0983	1794,583	4,795
1977	456,046	1561,083	4,435833
1978	456,0133	1482,083	4,470833
1979	455,894	1515	3,696667
1980	455,7502	1462,25	4,465
1981	455,6694	1507,5	4,138333

Год	Уровень Байкала (среднее значение за год), м	Показатели расходов Иркутской ГЭС, т.е. сток через ГЭС (среднее значение за год), м <sup>3</sup> /с	Приток в Байкал, м <sup>3</sup>
	$Y$	$x_1$	$x_2$
1982	455,8673	1298,417	5,405
1983	456,4317	1792,083	5,9825
1984	456,6317	1954,75	5,929167
1985	456,7355	2466,75	6,860833
1986	456,6697	2087,75	5,654167
1987	456,3792	1741,083	4,035
1988	456,5933	2078,333	7,035
1989	456,524	1989,167	4,75
1990	456,5659	1889,667	6,260833
1991	456,6368	2259,333	5,941667
1992	456,6166	2088,5	5,4925
1993	456,577	2105,583	6,243333
1994	456,6871	2191,5	6,929167
1995	456,6649	2445,5	6,134167
1996	456,4492	1641,333	4,337167
1997	456,3552	1684,583	5,144167
1998	456,4567	2076,75	6,0525
1999	456,4626	1805,333	4,66
2000	456,4242	1711,583	4,835833
2001	456,4958	2030,667	5,29775
2002	456,4192	1751	4,447583
2003	456,3225	1444,75	4,15575
2004	456,5	1845,583	5,006417
2005	456,47	1586,917	4,73175
2006	456,4933	1698,75	5,139083
2007	456,4683	1643	4,52825
2008	456,4717	1740,667	5,283333
2009	456,4967	1772,75	5,22675
2010	456,465	1683,417	4,367
2011	456,4383	1554,5	4,206
2012	456,4717	1754,5	5,42875
2013	456,4533	1598,75	4,7255
2014	456,3492	1636,167	3,909333
2015	456,0983	1295,25	3,53875
2016	456,0658	1297,333	4,280583
2017	456,1042	1298,083	3,686417
2018	456,2783	1407,667	5,977667

Приложение 2

Прогнозные  $y_{расч}$  и фактические  $y_{факт}$  значения уровня воды

Наблюдение	$y_{расч}$	$y_{факт}$
1	456,4278	456,2117
2	456,5251	456,3992
3	456,4743	456,6342
4	456,4605	456,7267
5	456,53	456,8283
6	456,5498	456,5575
7	456,5673	456,5033

Наблюдение	$Y_{расч}$	$Y_{факт}$
8	456,535	456,5258
9	456,5547	456,5433
10	456,4675	456,3192
11	456,3814	456,355
12	456,6154	456,5079
13	456,356	456,2482
14	456,5918	456,4352
15	456,6206	456,4695
16	456,5132	456,219
17	456,4257	456,0983
18	456,2473	456,046
19	456,1739	456,0133
20	456,2053	455,894
21	456,1545	455,7502
22	456,1983	455,6694
23	455,9781	455,8673
24	456,4241	456,4317
25	456,5151	456,6317
26	456,6198	456,7355
27	456,5687	456,6697
28	456,3899	456,3792
29	456,5655	456,5933
30	456,5307	456,524
31	456,482	456,5659
32	456,6106	456,6368
33	456,569	456,6166
34	456,5745	456,577
35	456,5977	456,6871
36	456,621	456,6649
37	456,3151	456,4492
38	456,3488	456,3552
39	456,565	456,4567
40	456,4326	456,4626
41	456,3689	456,4242
42	456,548	456,4958
43	456,3968	456,4192
44	456,137	456,3225
45	456,4571	456,5
46	456,2698	456,47
47	456,3594	456,4933
48	456,3164	456,4683
49	456,3896	456,4717
50	456,4115	456,4967
51	456,3479	456,465
52	456,2414	456,4383
53	456,3992	456,4717
54	456,2799	456,4533
55	456,3109	456,3492
56	455,9744	456,0983
57	455,9769	456,0658
58	455,9777	456,1042
59	456,0989	456,2783



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гармаев Е.Ж. Уровненный режим оз. Байкал: состояние и перспективы в новых условиях регламентации / Е.Ж. Гармаев, Б.З. Цыдыпов. — DOI 10.18101/2587-7143-2019-1-37-44. — EDN VWAXRD // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. — 2019. — № 1. — С. 37–44.
2. Фролов А.В. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня озера Байкал и стока реки Ангары / А.В. Фролов, Т.Ю. Выручалкина. — DOI 10.7868/S0321059617030099. — EDN YRWHNV // Водные ресурсы. — 2017. — Т. 44, № 3. — С. 264–274.
3. Потемкина Т.Г. Озерно-речная система оз. Байкал — р. Селенга в условиях изменяющейся окружающей среды / Т.Г. Потемкина, В.Л. Потемкин, Е.А. Гусева. — DOI 10.21285/0301-108X-2016-55-2-103-115. — EDN WAXNFB // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. — 2016. — № 2 (55). — С. 103–115.
4. Риски маловодных и многоводных периодов для озера Байкал / В.М. Никитин, Н.В. Абасов, Т.В. Бережных, Е.Н. Осипчук. — DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(29-38). — EDN XQRYGX // География и природные ресурсы. — 2016. — № 5. — С. 29–38.
5. Багайников М.Л. Особенности финансово-экономического механизма повышения водоресурсного потенциала Иркутской области: бассейновый подход / М.Л. Багайников, И.Б. Москвитин. — EDN HCFKTB // Экономика устойчивого развития. — 2021. — № 2 (129). — С. 216–221.
6. Калихман А.Д. Некоторые эколого-экономические проблемы озера Байкал / А.Д. Калихман, Т.П. Калихман, В.И. Зоркальцев. — DOI 10.53954/9785604607893\_486. — EDN TJDMWD // Труды II Гранберговской конференции : сб. докл. Всерос. конф. — Новосибирск, 2021. — С. 486–495.
7. Ограничение на вылов байкальского омуля *Coregonus migratorius* (Georgi, 1775) и вероятные экологические последствия / М.М. Макаров, В.И. Зоркальцев, Н.Н. Деникина, Е.В. Дзюба. — EDN FWSOZL // Юг России: экология, развитие. — 2020. — Т. 15, № 3 (56). — С. 132–143.
8. Мамонтов А.М. Оценка общих уловов омуля в озере Байкал / А.М. Мамонтов. — EDN KEZWVL // География и природные ресурсы. — 2009. — № 1. — С. 75–80.
9. Перспективы рыбохозяйственного использования Маломорского рыбопромыслового района: экономическая оценка и обоснование / А.П. Суходолов, А.П. Федотов, М.М. Макаров [и др.]. — DOI 10.17150/2500-2759.2020.30(2).233-244. — EDN DTFJTT // Известия Байкальского государственного университета. — 2020. — Т. 30, № 2. — С. 233–244.
10. Семенченко С.М. Эффективность искусственного воспроизводства популяции байкальского омуля *Coregonus migratorius* / С.М. Семенченко. — EDN PJLTLU // Вестник рыбохозяйственной науки. — 2018. — Т. 5, № 2 (18). — С. 4–23.
11. Сорокина П.Г. Оценка объема залива Провал озера Байкал в геоинформационных системах QGIS и SAGA GIS / П.Г. Сорокина. — DOI 10.17150/2713-1734.2021.3(4).290-296. — EDN GKHDZG // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2021. — Т. 3, № 4. — С. 290–296.
12. Madry S. Introduction to QGIS. Open Source Geographic Information System / S. Madry. — Locate Press, 2021. — 224 p.
13. Эконометрика : учебник / под ред. И.И. Елисеевой. — Москва : Юрайт, 2014. — 453 с.

## REFERENCES

1. Garmaev E.Zh., Tsydyпов B.Z. Water Level Regime of Lake Baikal: Current State and Perspectives in the New Conditions of Regulation. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, geografiya = Bulletin of the Buryat State University. Biology, geography*, 2019, no. 1, pp. 37–44. (In Russian). EDN: VWAXRD. DOI: 10.18101/2587-7143-2019-1-37-44.
2. Frolov A.V., Vyruchalkina T.Y. Dynamic-Stochastic Modeling of Long-Term Fluctuations in Lake Baikal Levels and Angara River Runoff. *Vodnye resursy = Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 380–389. (In Russian). EDN: YRWHNV. DOI: 10.7868/S0321059617030099.
3. Potemkina T.G., Potemkin V.L., Guseva E.A. The Fluviolacustrine System of Lake Baikal — the Selenga River under Changing Environmental Conditions. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2016, no. 2, pp. 103–115. (In Russian). EDN: WAXNFB. DOI: 10.21285/0301-108X-2016-55-2-103-115.
4. Nikitin V.M., Abasov N.V., Berezhnykh T.V., Osipchuk E.N. Risks of Low- and High-Water Periods for Lake Baikal. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*, 2016, no. 5, pp. 29–38. (In Russian). EDN: XQRYGX. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(29-38).
5. Bagaynikov M.L., Maksimov I.B. Features of the Financial and Economic Mechanism for Increasing the Water Resource Potential of the Irkutsk Region: the Basin Approach. *Ekonomika ustoichivogo razvitiya = The Economics of Sustainable Development*, 2021, no. 2, pp. 216–221. (In Russian). EDN: HCFKTB.
6. Kalikhman A.D., Kalikhman T.P., Zorkaltsev V.I. Some Ecological and Economic Problems of Lake Baikal. *Proceedings of the II Granberg Conference*. Novosibirsk, 2021, pp. 486–495. (In Russian). EDN: TJDMWD. DOI: 10.53954/9785604607893\_486.
7. Makarov M.M., Zorkaltsev V.I., Denikina N.N., Dzyuba E.V. Limits for *Coregonus migratorius* (Georgi, 1775) Catches and Likely Ecological Effects. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie = South of Russia: Ecology, Development*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 132–143. (In Russian). EDN FWSOZL.
8. Mamontov A.M. Estimated total catches of omul in Lake Baikal. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*, 2009, no. 1, pp. 75–80. (In Russian).

9. Sukhodolov A.P., Fedotov A.P., Makarov M.M., Anoshko P.N., Sorokina P.G., Kolesnikova A.V., Zhabina D.A. Prospects of Fish-Husbandry Utilization of Maloye More Fishing Area: Economic Assessment and Substantiation. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2020, vol. 30, no. 2, pp. 233–244. (In Russian). EDN: DTFJTT. DOI: 10.17150/25002759.2020.30(2).233-244.


10. Semenchenko S.M. Efficiency of Artificial Reproduction of the Posolsk Subpopulation of Baikal Omuls (*Coregonus Migratorius*). *Vestnik rybokhozyaistvennoi nauki = The Bulletin of Fisheries Science*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4–23. (In Russian). EDN: PJLTLU.

11. Sorokina P.G. Estimation of the Bay Proval Volume in Lake Baikal Using the Qgis and the Saga Gis Geographic Information Systems. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2021, vol. 3, no. 4, pp. 290–296. (In Russian). EDN: GKHDZG. DOI: 10.17150/2713-1734.2021.3(4).290-296.

12. Madry S. *Introduction to QGIS. Open Source Geographic Information System*. Locate Press, 2021. 224 p.

13. Eliseeva I.I. (ed.). *Econometrics*. Moscow, Yurait Publ., 2014. 453 p.


#### Информация об авторе

Сорокина Полина Геннадьевна — старший преподаватель, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, младший научный сотрудник, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: ermolaeva\_polina@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2993-7887>.

#### Для цитирования

Сорокина П.Г. Прогнозный анализ изменения уровня воды в озере Байкал: социально-экономические и экологические последствия / П.Г. Сорокина. — DOI: 10.17150/2500-2759.2022.32(3).592-601. — EDN QVFXRJ // Известия Байкальского государственного университета. — 2022. — Т. 32, № 3. — С. 592–601.

#### Author

Polina G. Sorokina — Senior Lecturer, Department of Mathematics and Digital Technologies, Baikal State University, Research Assistant, Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: ermolaeva\_polina@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2993-7887>.

#### For Citation

Sorokina P.G. Predictive Analysis of Water-Level Changes in Lake Baikal: Social, Economic, and Environmental Impacts. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2022, vol. 32, no. 3, pp. 592–601. (In Russian). EDN: QVFXRJ. DOI: 10.17150/2500-2759.2022.32(3).592-601.